

A DINÂMICA DE SISTEMAS COMO FERRAMENTA DE SUPORTE AO TRANSPORTE SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Victor Hugo Souza de Abreu

Andrea Souza Santos

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE)

RESUMO

Nas últimas décadas, há um crescente interesse pela promoção do desenvolvimento sustentável, que busca reduzir os efeitos negativos das atividades humanas, como congestionamentos, poluição ambiental e a contribuição para o agravamento do aquecimento global, como o aumento da disparidade entre as sociedades, associadas à ocupação desordenada do meio urbano e a priorização do transporte privado. Nesse sentido, esta pesquisa busca averiguar, por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática, estudos científicos que aplicam a Dinâmica de Sistemas na solução de problemas relacionados ao transporte sustentável. Os resultados identificam que existem sete grandes áreas de aplicação sobre esse assunto que são: dinâmica de transições, políticas de incentivo ao transporte sustentável, divisão modal sustentável, logística sustentável, análise do ciclo de vida, poluição ambiental e nível de desempenho de estações e terminais.

ABSTRACT

In recent decades, there has been a growing interest in promoting sustainable development, which seeks to reduce the negative effects of human activities, such as congestion, environmental pollution and contributing to the worsening of global warming, such as increasing disparities between societies associated with disordered occupation of the urban environment and prioritization of private transportation. In this sense, this research seeks to ascertain, through a Systematic Bibliographic Review, scientific studies that apply the System Dynamics in the solution of problems related to sustainable transport. The results identify that there are seven major areas of application on this subject: transition dynamics, sustainable transport policies, sustainable modal split, sustainable logistics, life-cycle assessment, environmental pollution and the performance level of stations and terminals.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as crescentes preocupações com as mudanças ambientais e climáticas colocaram o desenvolvimento sustentável sob os holofotes (Litman, 2007). O desenvolvimento sustentável pode ser definido como um desenvolvimento que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades” (*United Nations World Commission on Environment and Development*, 1987). O planejamento urbano para o desenvolvimento sustentável se concentra no equilíbrio entre atividades econômicas, sociais e ambientais (Chen *et al.*, 2006). Segundo Hidayatno *et al.* (2012), o planejamento urbano deve integrar essas dimensões para buscar equitabilidade (interação entre a dimensão econômica e social), habitabilidade (correspondência do ambiente às necessidades sociais, em termos de qualidade de vida) e viabilidade (o desenvolvimento econômico deve respeitar o apoio e a capacidade dos ecossistemas).

Neste contexto, o transporte desempenha um papel fundamental no desenvolvimento sustentável urbano eficiente porque promove o crescimento econômico, a inclusão social, a expansão urbana, a distribuição de atividades e a equidade no uso do espaço urbano e de todas as utilidades. Entretanto, o transporte é um grande consumidor de combustíveis baseados em carbono (Hickmana *et al.*, 2010). Além disso, globalmente, o setor transporte é responsável por 23% das emissões totais de Gases do Efeito de Estufa (GEE), relacionadas com a energia, e 13% das emissões globais de GEE (UN-HABITAT, 2011; IPCC, 2014). Dessa forma, há a necessidade de investimentos em estudos e políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de novas tecnologias alternativas para veículos menos poluentes e que

gastem menos recursos, como uma opção para reduzir os impactos econômicos, sociais e ambientais do transporte (Onat *et al.*, 2016a).

Das ferramentas disponíveis para avaliar a incorporação de tecnologias sustentáveis nos transportes, a Dinâmica de Sistemas se destaca por ser baseada em uma sólida base matemática que possui protocolos bem desenvolvidos para construção, verificação e análise de modelos (Silva *et al.* 2015). Em particular, a modelagem de Dinâmica de Sistemas é uma ferramenta ideal para examinar sistemas complexos caracterizados por *feedbacks* e efeitos retardados, características que estão por trás de tantas questões relacionadas à sustentabilidade dos transportes com a dinâmica de transições, divisão modal sustentável, logística sustentável, etc.

Assim, surge a seguinte questão: qual é o estado atual das pesquisas relacionadas à aplicação da Dinâmica de Sistemas no transporte sustentável? Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar um apanhado geral de artigos científicos aplicáveis ao tema, por meio de Revisão Bibliográfica Sistemática, que utiliza criteriosos filtros de inclusão e qualificação de estudos. Como objetivos específicos têm-se: (I) Apresentar a evolução das publicações e citações ao longo dos anos; (II) Identificar os principais periódicos e países que mais publicam estudos sobre o assunto; (III) Verificar as principais áreas de aplicação desses estudos; e (IV) Realizar um breve resumo dos artigos mais citados na base de dados. Este estudo está estruturado da seguinte forma. A Seção 1 apresenta a contextualização do assunto, o problema e os objetivos da pesquisa. A Seção 2 trata da Dinâmica de Sistemas e sua aplicabilidade no transporte sustentável. A Seção 3 apresenta e descreve o procedimento metodológico. A Seção 4 apresenta e discute os resultados. Finalmente, a Seção 5 contém as considerações finais.

2. A DINÂMICA DE SISTEMAS E O TRANSPORTE SUSTENTÁVEL

O desenvolvimento sustentável é um processo dinâmico que reconhece as necessidades da sociedade, a proteção efetiva do meio ambiente, o uso prudente dos recursos naturais e a manutenção de níveis elevados e estáveis de crescimento econômico e emprego. Assim, as estratégias para sua formulação são complexas, pois precisam envolver uma combinação de fatores baseados no equilíbrio entre os três pilares do desenvolvimento sustentável: social, econômico e ambiental (Figura 1). Os três pilares apresentados se juntam para adicionar todo um contexto sustentável, que dá a qualquer projeto o potencial de reduzir impactos no meio ambiente e na vida das pessoas. Em cada um dos pilares são levados em conta contextos específicos que devem ser considerados em cada caso.



Figura 1: Três Pilares da Sustentabilidade.

Nesse contexto, sistemas eficientes de transporte são fundamentais para o desenvolvimento sustentável das cidades. Sem transporte, os cidadãos não poderiam acessar fisicamente empregos, serviços de saúde, educação e outras necessidades e comodidades importantes. Além disso, sem acesso a serviços, recursos e mercados, o crescimento econômico é limitado e a redução da pobreza não pode ser alcançada (Hall e Sussman, 2004). Gilbert *et al.* (2003) apontam que o transporte sustentável: (I) Permite que as necessidades básicas dos indivíduos e das sociedades sejam atendidas com segurança e de maneira consistente com o ecossistema; (II) É acessível, opera de forma eficiente, oferece opções de vários modos de transporte e suporta uma economia em expansão; (III) Limita as emissões e os resíduos para que as plantas sejam capazes de absorver, minimiza o consumo de recursos não renováveis, limita o consumo de recursos renováveis ao nível do desenvolvimento sustentável, reutiliza e recicla seus componentes e minimiza o ruído e uso da terra. Grande parte da capacidade de alcançar o desenvolvimento sustentável no setor de transportes envolve a criação de indicadores e medidas que guiam a sociedade para esse objetivo (Santos e Ribeiro, 2013 e 2015; Foresti *et al.*, 2014; Dorsey e Hardy, 2018). Nesse sentido, a Dinâmica de Sistemas pode auxiliar na avaliação de estratégias e fornece *insights* sobre possíveis mudanças no sistema durante a implementação dessas estratégias (Sterman, 2000).

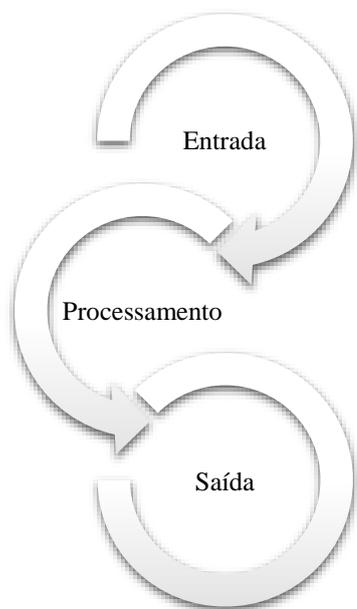
A Dinâmica de Sistemas tem sido utilizada com sucesso para basicamente entender duas questões: (I) A estrutura de relacionamento que rege o comportamento de um sistema; e (II) Comportamento de um sistema ao longo do tempo, isto é, sua dinâmica. Segundo Silva *et al.* (2015), Dinâmica de Sistemas é uma abordagem para analisar o comportamento de sistemas complexos, como os sistemas de transportes, considerando estritamente as características inerentes. Esta abordagem é baseada em conceitos matemáticos de processos não-lineares desenvolvidos em matemática e física e consolidados em engenharia. Os conceitos inerentes a esta abordagem auxiliam na criação de um modelo matemático que representa uma cadeia de produção, utilizando a simulação computacional. A Dinâmica de Sistema é um método para descrever, modelar, simular e analisar problemas e/ou sistemas dinamicamente complexos em termos de processos, informações, limites e estratégias organizacionais. Este método surgiu porque os métodos tradicionais para resolver problemas forneciam compreensão insuficiente dos processos estratégicos envolvidos em sistemas complexos. Assim, a Dinâmica de Sistemas é utilizada hoje em dia para quase todas as questões dinamicamente complexas (Pruyt, 2013).

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico deste artigo adota uma abordagem de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) para mapeamento dos principais estudos sobre o assunto averiguado. A RBS visa identificar, avaliar e integrar todos os resultados de estudos individuais relevantes, conforme critérios de inclusão e qualificação, que abordam uma ou mais questões relacionadas ao estudo proposto (Abreu, 2017). Durante a RBS, fontes que suportam a presença do problema sob investigação devem ser utilizadas (Barnes, 2005). Essa atividade permite ao pesquisador fornecer um forte argumento relacionado à necessidade do estudo, bem como o ponto em que a literatura se encaixa no objetivo estipulado (Levy e Ellis, 2006).

A metodologia de RBS utilizada neste artigo é baseada em Conforto *et al.* (2006) e Abreu (2017), que assim como estabelecido por Levy e Ellis (2006), dividiram a revisão bibliográfica em três fases, conforme apresentado na Figura 2. Na Fase 1, Fase de Entrada, há procedimentos que precisam ser cuidadosamente definidos para se obter informações

confiáveis e aplicáveis para o estudo. Levy e Ellis (2006) indicam que em qualquer abordagem sistemática que a Fase de Entrada é incorreta, de baixa qualidade ou irrelevante, os resultados obtidos na Fase de Saída serão ineficazes, independentemente da qualidade da Fase de Processamento. Na Fase 2, Fase de Processamento, são realizados as buscas, a leitura, a documentação e o arquivamento dos artigos selecionados para o estudo. A última fase da RBS, Fase de Saída, compreende as etapas de desenvolvimento de alertas, registro dos artigos, selecionados em filtros de inclusão e qualificação, e a síntese dos resultados.



Fase de Entrada: Identificação do problema, dos objetivos, das fontes primárias, dos termos de busca, dos critérios de inclusão e qualificação, dos métodos e ferramentas e do cronograma.

Fase de Processamento: Realização das buscas, filtragem, leitura e análise dos artigos e documentação e arquivamento.

Fase de Saída: Desenvolvimento de alertas, registro e descrição dos resultados.

Figura 2: Fases de Desenvolvimento da RBS.

Cabe ressaltar que, na Fase de Entrada, os termos de busca mais adequados foram definidos por meio de uma pesquisa preliminar nas fontes primárias. A seleção desses termos pode influenciar nos resultados da busca, sendo, então, uma atividade crucial. Além disso, busca-se definir os critérios de inclusão e qualificação dos artigos, necessários para a boa condução da pesquisa. Portanto, os termos utilizados, critérios de inclusão e qualificação, bem como os detalhes para a busca e extração do banco de dados, são apresentados na Tabela 1 (baseada em Abreu e Ribeiro, 2019).

Tabela 1: Descrição das Estratégias de Buscas.

Critério	Descrição
Tópico	TS ¹ = ("system* dynamic*" AND "sustainab* transport*")
Base de Dados	Web of Science
Indexes	SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI
Inclusão	(I) Tempo de cobertura: todos os anos da base de dados (1945 – 2019); (II) Enquadramento com o objetivo proposto; (III) Fator de impacto do periódico; e (IV) Tipos de documentos: somente artigos.
Qualificação	(I) A pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica bem fundamentada? (II) O estudo apresenta inovação técnica? (III) As contribuições são discutidas? (IV) As limitações são explicitamente declaradas? e (V) Os resultados e conclusões são consistentes com os objetivos pré-estabelecidos?
Data da Procura	08 de maio de 2019, as 22h00min

Notas: (1) TS = Tópico, que significa as palavras que serão pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos.

4. RESULTADOS

A partir da busca realizada no banco de dados *Web of Science*, foi possível verificar que apenas 19 publicações estavam aptas a serem incluídas do repositório de pesquisa, ou seja, atendiam aos critérios de inclusão e qualificação (qualidade e aplicabilidade). A Figura 3 mostra a evolução das publicações sobre o tema ao longo dos anos. Nela, verifica-se que a primeira publicação foi registrada em 2005, dado que demonstra que o assunto é atual. Além disso, o assunto continua em expansão, com ápice em 2016, e a curva acumulada representa o interesse crescente sobre o tema ao longo dos anos.

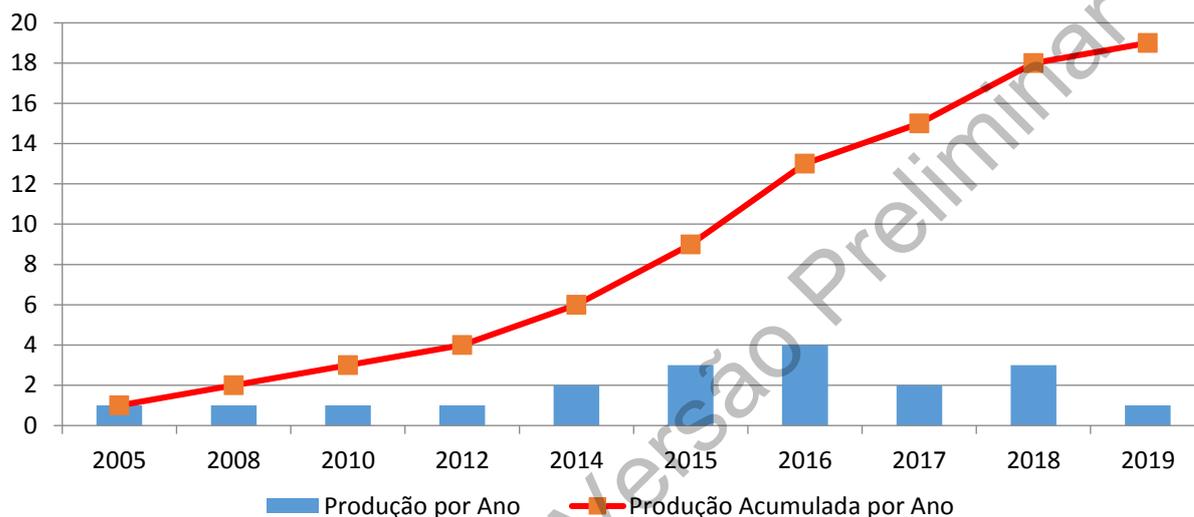


Figura 3: Evolução das publicações sobre a Dinâmica de Sistemas no transporte sustentável.

Torna-se também pertinente avaliar os artigos por periódico de publicação, de modo a identificar quais são as revistas que mais se interessam pelo assunto, bem como o fator de impacto de cada uma delas. Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta os periódicos que publicaram estudos sobre o assunto.

Tabela 2: Principais periódicos sobre o assunto.

Periódicos de Publicação	P ¹	FI ²
<i>Energy</i>	11%	4,968
<i>International Journal of Sustainable Transportation</i>	11%	1,892
<i>Journal of Cleaner Production</i>	11%	5,651
<i>Cities</i>	5%	2,704
<i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>	5%	2,500
<i>International Journal of System Dynamics Applications</i>	5%	4,195
<i>JASSS The Journal of Artificial Societies and Social Simulation</i>	5%	1,640
<i>Journal of Environmental Informatics</i>	5%	4,521
<i>Journal of Transport Geography</i>	5%	2,699
<i>Management Research Review</i>	5%	0,900
<i>Sustainability</i>	5%	2,075

Periódicos de Publicação	P ¹	FI ²
<i>Technological Forecasting and Social Change</i>	5%	3,131
<i>Transport Reviews</i>	5%	4,647
<i>Transportation</i>	5%	3,151
<i>Transportation Science</i>	5%	3,338
<i>Transportmetrica B Transport Dynamics</i>	5%	2,636

Notas: (1) P (Publicações) refere-se a porcentagem de artigos publicados no periódico sobre a área de interesse investigada. (2) FI (Fator de Impacto) avalia a importância de periódicos científicos em suas respectivas áreas. Os valores apresentados na Coluna FI correspondem ao ano de 2017.

Na Tabela 2, nota-se que os periódicos que mais abordam sobre o assunto são: *Energy*, *International Journal of Sustainable Transportation* e *Journal of Cleaner Production*, com duas publicações cada. Além disso, nota-se que ao ordenar os periódicos por fator de impacto, foi possível identificar que os mais relevantes são: *Journal of Cleaner Production* e *Energy* e *Transport Reviews*, com fator de impacto acima de quatro.

Também se considerou pertinente avaliar quais são os países de origem das Instituições de Ensino dos autores que mais desenvolvem artigos relevantes sobre o assunto. Dessa forma, os países com maior número de publicações se encontram identificados na Tabela 3. Nela, nota-se que os países que mais publicam estudos sobre o assunto são: EUA, com 21% das publicações, Nova Zelândia e China, com 16% das publicações cada, e Canadá e Alemanha, com 11% das publicações cada. Salienta-se ainda que os seguintes países apresentaram uma publicação diretamente relacionada ao tema: Austrália, Áustria, Colômbia, Inglaterra, França, Islândia, Irã, Itália, Malásia, Holanda, Espanha e Tunísia.

Tabela 3: A intensidade das publicações internacionais.

Países	P ¹
EUA	21%
Nova Zelândia	16%
China	16%
Canadá	11%
Alemanha	11%

Nota: (1) P (Publicações) refere-se a porcentagem de artigos publicados por país sobre a área de interesse investigada. (2) B indica a representatividade no número total de publicações.

Considerou-se pertinente ainda avaliar os estudos por área de aplicação, de modo a identificar as principais abordagens de análises em artigos que aplicam a Dinâmica de Sistemas no transporte sustentável. Dessa forma, identificam-se sete grandes áreas de aplicação (Tabela 4):

- Dinâmica de transições: averiguam as mudanças e incertezas relacionadas aos impactos ambientais, econômicos e sociais que ocorrem com a introdução de novas tecnologias no setor de transporte como, por exemplo, a incorporação de veículos elétricos no mercado;
- Políticas de incentivo ao transporte sustentável: analisam os impactos de várias políticas implementadas pelos governos para reduzir o uso de veículos automotores

privados em favor de outros modos de transporte mais sustentáveis como os veículos elétricos e bicicletas;

- **Análise do ciclo de vida:** analisam as fases do ciclo de vida que envolvem a extração e o processamento, o transporte, o uso e o fim de vida do produto ou sistema em análise. Modelos de avaliação do ciclo de vida têm sido amplamente utilizados na literatura para avaliar os impactos ambientais associados sobre os ciclos de vida dos veículos convencionais e elétricos;
- **Divisão modal sustentável:** incentiva a mobilidade sustentável, multimodalidade com prioridade para pedestres e ciclistas, análise multicriterial com aspectos ambientais e sociais, infraestrutura eficiente, viagem como atividade de valor, tempos de viagem razoáveis e confiáveis, integração entre pessoas e tráfego, entre outros aspectos;
- **Logística sustentável:** otimiza a entrega do produto, atendendo às expectativas do cliente, no que concerne a tempo e custo. Além disso, otimiza o uso dos recursos necessários para o transporte, evitando emissões de gases poluentes em excesso na atmosfera, desperdícios de insumos, entre outras ações;
- **Poluição ambiental:** avaliam a emissão de poluentes atmosféricos (gases e partículas sólidas resultantes das atividades humanas) para avaliação do impacto de opções alternativas de veículos; e
- **Nível de desempenho de Estações e Terminais:** avaliam o desempenho de estações e terminais (pontos de convergência entre as várias linhas de transporte e que podem ser simplesmente descritos como pontos de partida, chegada e circulação de passageiros ou mercadorias) quanto ao tempo e custo.

Conforme pode ser notado pela Tabela 4, as áreas com maior número de publicações são: dinâmica de transições, com 32% dos estudos; políticas de incentivo ao transporte sustentável, com 21% dos estudos; e análise do ciclo de vida, com 16% dos estudos.

Tabela 4: Divisão dos Artigos por Área de Aplicação.

Área de Aplicação	P¹
Dinâmica de Transições	32%
Políticas de Incentivo ao Transporte Sustentável	21%
Análise do Ciclo de Vida	16%
Divisão Modal Sustentável	11%
Logística Sustentável	11%
Poluição Ambiental	5%
Nível de Desempenho de Estações/ Terminais	5%

Nota: (1) P (Publicações) refere-se a porcentagem de artigos publicados por país sobre a área de interesse investigada. Fonte: Elaboração própria.

Outra análise importante refere-se ao número de citações por ano, conforme apresentado na Figura 4. Observa-se que a primeira citação ocorreu no ano de 2007 e que o número de citações cresceu com o passar dos anos, atingindo o ápice em 2017. Esses dados mostram que o interesse pelo assunto continua em expansão.

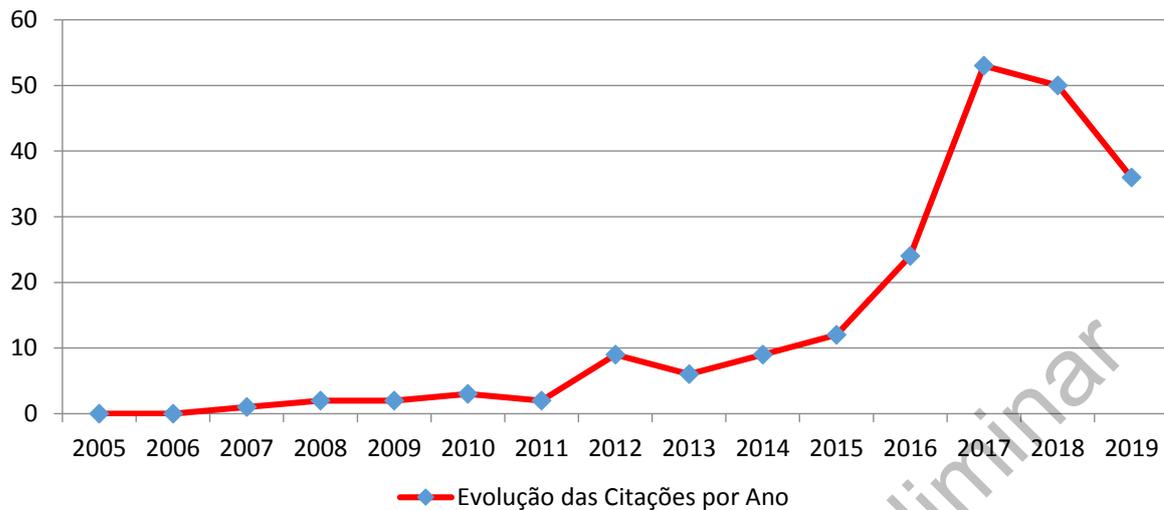


Figura 4: Evolução das citações por ano.

Também é pertinente analisar os artigos com maior número de citações, como mostra a Tabela 5, que apresenta os estudos com mais de 15 citações na Base *Web of Science*. A partir da avaliação da Tabela 5, foi possível verificar que os artigos com maior número de citações são: Bergman *et al.* (2008), com 41 citações; Haghshenas *et al.* (2015), com 31 citações; e Onat *et al.* (2016), com 21 citações. Além disso, ao considerar o número médio de citações por ano, os artigos em destaque são: Haghshenas *et al.* (2015) e Onat *et al.* (2016), com cerca de 7 citações por ano.

Tabela 5: Os artigos mais citados da Base de Dados.

Artigo	Referencia	Área de Aplicação	C ¹	MCA ²
<i>Modelling Socio-Technical Transition Patterns and Pathways</i>	Bergman <i>et al.</i> (2008)	Dinâmica de Transições	41	3,73
<i>Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan</i>	Haghshenas <i>et al.</i> (2015)	Políticas de Incentivo ao Transporte Sustentável	31	7,75
<i>Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles</i>	Onat <i>et al.</i> (2016a)	Análise do Ciclo de Vida	21	7,00
<i>Comparative analysis of hydrogen, biofuels and electricity transitional pathways to sustainable transport in a renewable-based energy system</i>	Shafiei <i>et al.</i> (2015)	Dinâmica de Transições	19	4,75
<i>Uncertainty-embedded dynamic life cycle sustainability assessment framework: An ex-ante perspective on the impacts of alternative vehicle options</i>	Onat <i>et al.</i> (2016b)	Análise do Ciclo de Vida	16	5,33

Notas: (1) C (Citações) refere-se ao quantitativo de artigos que mencionam o artigo analisado. (2) MCA (Média de Citações por Ano) refere-se ao valor médio obtido pelo número de citações totais dividido pelos anos decorrentes desde sua publicação.

A fim de salientar os principais assuntos analisados nesses artigos, busca-se apresentar um breve resumo sobre cada um dos artigos mais relevantes da base de dados, conforme segue.

Bergman *et al.* (2008) desenvolveram um modelo de simulação para avaliar inovações sistêmicas ou "transições" de sistemas sociais para um desenvolvimento mais sustentável. O trabalho teve como objetivo geral delinear princípios de *design* para modelos que possam oferecer novos *insights* sobre como lidar com problemas persistentes em sistemas de larga escala, como o sistema de transporte rodoviário europeu ou a gestão regional de recursos hídricos. A natureza sistêmica desses problemas está associada ao fato de serem complexos, incertos e atravessarem vários setores, e indica a necessidade de soluções tecnológicas e comportamentais radicais que abordem mudanças no nível dos sistemas, em vez de oferecer mudanças incrementais nos subsistemas. O modelo combina técnicas de modelagem, baseadas em agentes, e Dinâmica de Sistemas e inclui interações de agentes e subsistemas individuais, bem como efeitos cumulativos nas estruturas do sistema. Os testes mostram o sucesso na simulação de diferentes caminhos históricos de transição, adaptando os parâmetros e regras do modelo para cada exemplo. Finalmente, os autores discutem as melhorias necessárias para explorar e detalhar sistematicamente os caminhos de transição em aplicações empíricas de estudo de casos para transições atuais e futuras, como a transição para um sistema de transporte sustentável na Europa.

Haghshenas *et al.* (2015) analisam os impactos de várias políticas de transporte em Isfahan, no Irã, utilizando um modelo de Dinâmica de Sistemas com base em dados pertinentes das cidades do mundo. O banco de dados do estudo foi desenvolvido com base em informações abrangentes, cobrindo inúmeras cidades ao longo de quatro décadas. Para análise dos resultados foram selecionados nove indicadores de transporte urbano sustentável, três indicadores apresentando cada grupo-chave de sustentabilidade ambiental, econômica e social. Um índice composto foi aplicado para combinar os indicadores selecionados. A geração de viagens, a participação modal, a oferta de transporte e o equilíbrio entre oferta e demanda foram os principais módulos do modelo desenvolvido. Além disso, os indicadores econômicos, sociais e ambientais foram os principais resultados do modelo. Os insumos do modelo foram características urbanas pertinentes ao transporte. Ao monitorar os indicadores de transporte sustentável utilizando cenários futuros, foram identificadas políticas de transporte eficazes como o desenvolvimento de uma rede integrada de monitoramento de trânsito que se configura como a política mais importante para a sustentabilidade em Isfahan.

Onat *et al.* (2016a) apresentaram uma abordagem prática e inovadora para: (I) Ampliar a avaliação existente da sustentabilidade do ciclo de vida, considerando impactos ambientais, econômicos e sociais em nível macro; (II) Aprofundar a estrutura existente, capturando as relações dinâmicas complexas entre indicadores por meio de modelagem de ciclo causal; (III) Entender a complexidade dinâmica da sustentabilidade do transporte para os impactos triplos (ambientais, econômicos e sociais) dos veículos alternativos e finalmente; e (IV) Investigar os impactos de vários cenários específicos de veículos como uma nova abordagem para a seleção de uma unidade funcional de nível macro, considerando todas as interações complexas nos aspectos ambientais, sociais e econômicos. Um modelo de análise do ciclo de vida, dinâmico e integrado, foi utilizado para analisar o impacto no ciclo de vida ambiental, econômico e social, bem como o custo do ciclo de vida de veículos alternativos nos EUA. A análise abrange os impactos da fase de fabricação e operação de veículos de combustão interna, veículos elétricos híbridos, veículos elétricos híbridos *plug-in* e veículos elétricos a

bateria. No total, sete indicadores de nível macro são selecionados: potencial de aquecimento global, formação de partículas, formação de oxidantes fotoquímicos, custo de propriedade de veículos, contribuição para o produto interno bruto, geração de emprego e impactos na saúde humana. Os resultados da análise revelaram que o setor de transporte dos EUA, sozinho, não pode reduzir os impactos negativos da mudança climática global, mesmo que toda a frota seja substituída por veículos elétricos a bateria. Reduzir a mudança climática requer metas muito mais ambiciosas e esforços colaborativos internacionais. O uso de diferentes tipos de veículos tem um pequeno impacto no bem-estar público, que é uma função dos índices de renda, educação e expectativa de vida.

Shafiei *et al.* (2015) apresentam uma análise comparativa entre veículos do tipo elétrico, de hidrogênio e biocombustível para um futuro transporte rodoviário sustentável na Islândia, um país com um sistema de energia de base renovável. A análise é baseada em um modelo de Dinâmica de Sistemas (UniSyD_IS), que é dividido em quatro módulos principais: fornecimento de combustível, preços de combustível, estações de reabastecimento e demanda de combustível. Ele simula as evoluções em longo prazo de veículos leves e pesados, levando em conta as etapas de fornecimento e utilização de combustíveis alternativos. Três cenários são definidos para promover a infraestrutura de abastecimento de combustível para os três tipos de veículos (hidrogênio, biocombustível e elétricos). Os resultados da simulação para esses cenários são comparados em termos de diferentes indicadores de energia, econômicos e ambientais. Também indicam que o caminho da eletricidade tem vantagens sobre outros, na redução da demanda total de combustível, custo de mitigação e rentabilidade do fornecimento de combustível. O caminho do biocombustível seria a alternativa mais atraente em termos de redução de emissões, participação de combustíveis alternativos e benefícios econômicos do consumidor. A análise mostra que o cenário de hidrogênio poderia ser vantajoso na redução da importação de combustível e dos custos de combustível para o consumidor, embora tenha o maior custo de propriedade de veículos e desenvolvimento de infraestrutura.

Onat *et al.* (2016b) desenvolvem uma estrutura de avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida dinâmico para abordar, tanto os desafios metodológicos, quanto as incertezas na pesquisa de sustentabilidade do transporte. A abordagem proposta fornece uma estrutura de avaliação de sustentabilidade abrangente e baseada em sistemas, capturando as relações dinâmicas entre os parâmetros dentro do sistema de transporte dos EUA como um todo, com relação aos seus impactos ambientais, sociais e econômicos. Ao usar uma análise de incerteza multivariada, a probabilidade dos potenciais de redução de impacto de diferentes tipos de veículos, bem como os limites comportamentais dos potenciais de sustentabilidade de cada tipo de veículo são analisados. Sete categorias de impacto de sustentabilidade são dinamicamente quantificadas para quatro diferentes tipos de veículos (combustão interna, veículos híbridos, híbridos *plug-in* e elétricos) entre 2015 e 2050. Embora os impactos dos veículos elétricos tenham a maior incerteza, eles são esperados (90% de confiança) ser a melhor alternativa em longo prazo para reduzir os impactos na saúde humana e a poluição do ar causada pelo transporte. Os resultados baseados em valores determinísticos (médios) indiquem que os veículos elétricos têm maior potencial de redução das emissões de GEE.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversas áreas do conhecimento buscam estudar o desenvolvimento sustentável como forma de reduzir os problemas enfrentados atualmente pelos grandes centros urbanos. Como esperado, na área de transporte essa realidade não é diferente. Hoje em dia, muitos trabalhos

tentam aplicar métodos e ferramentas para reduzir as externalidades negativas decorrentes da priorização do transporte individual em detrimento do transporte público, do desrespeito aos modos de transporte não motorizado e do planejamento urbano ineficiente, como é o caso da Dinâmica de Sistemas. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo coletar, reunir e avaliar os principais estudos relevantes sobre a aplicação da Dinâmica de Sistemas no transporte sustentável e realizar análises sistemáticas sobre o assunto.

Os resultados mostram que a primeira publicação sobre o assunto foi registrada no ano de 2005 e que o assunto continua em expansão, com ápice em 2016. Observa-se que a primeira citação ocorreu no ano de 2007 e que o número de citações cresceu com o passar dos anos, atingindo o ápice em 2017. Nota-se ainda que periódicos com elevado fator de impacto publicaram estudos sobre o assunto, como o *Journal of Cleaner Production*, *Energy* e *Transport Reviews*, e que os países que mais desenvolvem estudos sobre o assunto são: EUA, Nova Zelândia, China, Canadá e Alemanha. Além disso, foi possível identificar sete grandes áreas de aplicação da Dinâmica de Sistemas no transporte sustentável que são: dinâmica de transições, políticas de incentivo ao transporte sustentável, divisão modal sustentável, logística sustentável, análise do ciclo de vida, poluição ambiental e nível de desempenho de estações e terminais.

Dentre os artigos mais citados na base de dados, Bergman *et al.* (2008) desenvolveram um modelo de simulação para avaliar inovações sistêmicas para um desenvolvimento mais sustentável, Haghshenas *et al.* (2015) analisam os impactos de várias políticas de transporte para incentivo ao transporte sustentável, Onat *et al.* (2016a) e Onat *et al.* (2016b) apresentaram uma abordagem para avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida, considerando, respectivamente, os impactos ambientais, econômicos e sociais em nível macro e os desafios metodológicos e as incertezas na pesquisa de sustentabilidade do transporte e Shafiei *et al.* (2015) apresentam uma análise comparativa entre veículos do tipo elétrico, de hidrogênio e biocombustível para um futuro transporte rodoviário sustentável.

Como limitação, menciona-se que o estudo utilizou apenas um banco de dados (*Web of Science*), não considerando publicações contidas em outras bases de dados como *ScienceDirect*, *Scielo* e *Scopus*. Além disso, é importante destacar que os termos de busca podem influenciar nos resultados, portanto, os artigos incluídos no repositório de pesquisa são limitados pelo banco de dados e os termos de busca utilizados.

REFERENCIAS

- Abreu, V. H. S. (2017). Revisão bibliográfica sistemática sobre o problema de localização de sensores de tráfego em redes. *XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes*, ANPET.
- Abreu, V. H. S., e Ribeiro, G. M. (2019). Mapeamento de Metaheurísticas aplicadas ao Problema de Localização de Sensores em Redes. *LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, SBPO.
- Barnes, S. J. (2005). Assessing the value of IS journals. *Communications of the ACM*, v. 48, n. 1, p. 110–112.
- Bergman, N., Haxeltine, A., Köhler, J., Schilperoord, M., e Rotmans, J. (2008). Modelling Socio-Technical Transition Patterns and Pathways. *JASSS - The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 11, n. 3, p. 7.
- Chen, M. C., Ho, T. P., e Jan, C. G. (2006). A System Dynamics Model of Sustainable Urban Development: Assessing Air Purification Policies at Taipei City. *Asian Pacific Planning Review*, v. 4, n. 1, p. 1.
- Conforto, E. C., Amaral, D. C., e Silva, S. L. (2011). Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos. *Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – CBGDP*, p. 1–12.
- Dorsey, J. W., e Hardy, L. C. (2018). *Sustainability factors in dynamical systems modeling: Simulating the non-linear aspects of multiple equilibria*. Ecological Modelling.

- Foresti M., Wild L., Takeuchi L. R., e Norton A. (2014). *Governance targets and indicators for post 2015. An initial assessment*. The Overseas Development Institute (ODI).
- Gilbert, R., Irwin, N., Hollingworth, B., Blais, P., Lu, H., e Brescacin, N. (2003). Sustainable transportation performance indicators (STPI). *In Proceedings of the annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Haghshenas, H., Vaziri, M., e Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, v. 45, p. 104–115.
- Hall, R. P., e Sussman, J. M. (2004). *Sustainable Transportation—a Strategy for System Change*. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division. Working Paper Series. ESD-WP-2004-02.
- Hidayatno, A., Rahman, I., e Muliadi, R. (2012). *A system dynamics sustainability model to visualize the interaction between economic, social, and environment aspects of JAKARTA's urban development*. International seminar on science and technology innovation, University of Al Azhar Indonesia, Jakarta.
- Hickmana, R., Ashirub, O., e Banister, D. (2010). Transport and climate change: Simulating the options for carbon reduction in London. *Transport Policy*, v. 17, n. 2, p. 110–125.
- IPCC. (2014). *Summary for Policymakers*. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, J.C. (Eds.), *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Levy, Y., e Ellis, T. J. (2006). A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research. *Informing Science: The International Journal of an Emerging Transdiscipline*, v. 9, p. 181–212.
- Litman, T. (2007). Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1, p.10–15.
- Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O., e Egilmez, G. (2016a). Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n.7, p. 1009–1034.
- Onat, N. C., Kucukvar, M., e Tatari, O. (2016b). Uncertainty-embedded dynamic life cycle sustainability assessment framework: An ex-ante perspective on the impacts of alternative vehicle options. *Energy*, v. 112, p. 715–728.
- Pruyt, E. (2013). *Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity*. Delft: TU Delft Library. 324 p.
- Santos, A. S., e Ribeiro, S. K. (2013). The use of sustainability indicators in urban passenger transport during the decision-making process: the case of Rio de Janeiro, Brazil. *Curr. Opin. Environ. Sustainability*, v. 5, p. 251–260.
- Santos, A. S., e Ribeiro, S. K. (2015). The role of transport indicators to the improvement of local governance in Rio de Janeiro City: A contribution for the debate on sustainable future. *Case Studies on Transport Policy*, v. 3, n. 4, p. 415–420.
- Shafiei, E., Davidsdóttir, B., Leaver, J., Stefansson, H., e Asgeirsson, E. I. (2015). Comparative analysis of hydrogen, biofuels and electricity transitional pathways to sustainable transport in a renewable-based energy system. *Energy*, v. 83, p. 614–627.
- Silva, O. R., Guevara, A. H., Palmisano, A., e Rosini, A. M. (2015). *Dynamic Model for Evaluation of Sustainability of Brazilian Ethanol Production: Elements for Modeling*. 5th International Workshop. Advances in Cleaner Production – Academic Work.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, p.41-81.
- United Nations World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. ringofpeace.org/environment/brundtland.html.
- UN-HABITAT, (2011) *Cities and climate change: global report on human settlements*. Earthscan, 279 p. Washington, DC, USA. ISBN. 9781849713719.

Victor Hugo Souza de Abreu (victor@pet.coppe.ufrj.br)
Andrea Souza Santos (andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br)
Programa de Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Horácio Macedo, 2030, 101 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil